

複数開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その1) LES を用いた単一及び対面開口の比較

正会員 ○小林 知広^{*1} 同 梅宮 典子^{*2}
同 近本 智行^{*3} 同 LIM Eunsu^{*4}

4. 環境工学 -12. 空気流動基礎

対面開口 単一開口 CFD LES

1. はじめに

風力換気量の予測には一般に有効開口面積と風圧係数を用いるが、この手法では単一開口や風圧係数差がない2開口では換気量が0と算定される。実際には風の乱れの影響により換気がなされるが、その換気量を簡易に求める手法は確立されているとはいえない。既往の研究として単一開口や片側開口については Warren ら¹⁾ や山中ら²⁾ の混合理論に基づく研究や、河野・加藤ら³⁾ による開口換気促進のための開口附属要素に関する研究が見られる。風圧係数差のある2開口を対象にした通風量については、倉渕ら⁴⁾ の局所相似モデルや甲谷・山中⁵⁾ によるベクトル合成モデル等の研究がある。しかし、2開口間で風圧係数差が小さい場合の換気効果にはまだ不明な点が多いと言える。そこで本研究では、主として風圧係数差がない2開口を有する室モデルを対象とし、乱れの影響を評価する。本報では風圧係数差のない2開口の例として対面する2面に開口を有する室モデルに対して横風がアプローチする気流場を検討対象とし、単一開口との比較も行う。評価方法としては、LES の計算で Particle Tracing⁶⁾ を行うことで開口面積と換気効果の関係を Purging Flow Rate⁷⁾ (以降 PFR) を用いて評価する。

2. 室外側のみの解析による計算格子の検討

2.1. 研究対象とした室モデル

風洞における縮小模型実験を想定した CFD 解析を行う。検討対象模型(室モデル)は外寸 200 mm 角の立方体模型とし、幅と高さが 1,000 mm、長さ 3,200 mm の解析領域の流路の床面に設置した。本章では開口無し の模型として室外の格子検討を行う。図 1 に解析領域と計算格子の一例(後述の Type 2)を示す。

2.2 格子検討における CFD 解析概要

格子依存性の有無を確認するため、室モデル外壁面から各方向への第一メッシュの幅が異なる4種類の格子(Type 1~4)を設定した。各 Type の室モデル周辺の XY 断面図を図 2 に示す。解析はまず標準 k-ε モデルを用いて十分に計算を収束させた後、その結果を初期条件として LES を用いて計算を行った。LES での計算時間間隔は 0.0005 [s] とし、計算開始後の 2,000 time step (1.0 [s]) を標準 k-ε モデルからの移行期間とみなして計算結果を破棄し、その後の 20,000 time step (10.0 [s]) を本計算とした。流入境界条件は図 3 に示す境界層流(基準高さ 900 mm で 10 m/s)に Smimov⁸⁾ らの手法を適用して変動風を与えた。なお、ここでの壁面境界条件は Linear-Log Law に基づく2層モデルとした。表 1 に解析手法を示す。

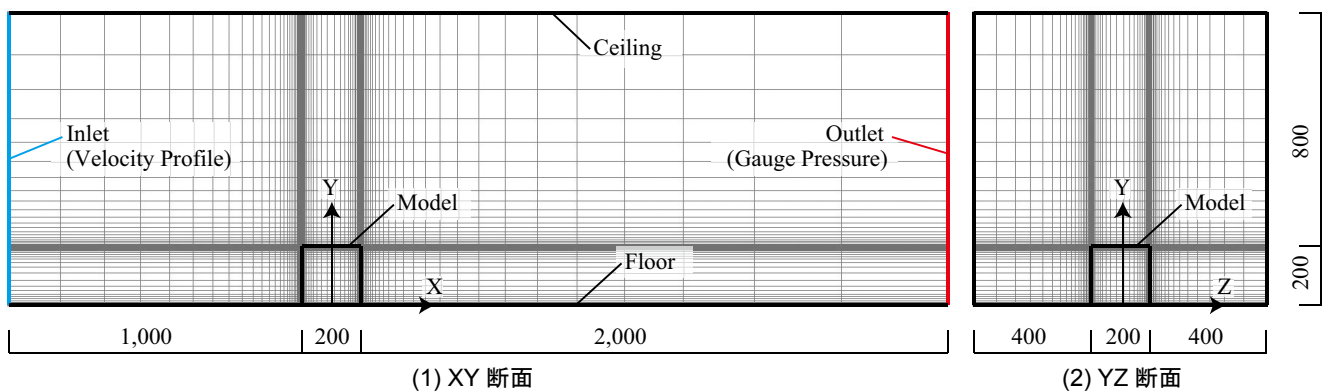


図 1 計算対象領域及び格子レイアウト (単位 [mm])

Ventilation Effect by Airflow Turbulence for a Room with Multiple Openings
Part 1. Comparison between Single-Sided and Double-Sided Opening by LES

KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko, CHIKAMOTO Tomoyuki, and LIM Eunsu

2.3 解析結果

図4に示す中心断面におけるスカラー風速の平均値が滑らかに分布していることから、平均化時間に大きな問題はないと判断した。図5に示す風速のX成分の平均値を見ると、Type4のみ大きく外れており、Type1, 2, 3は全体的には大きな際は見られない。ここでは計算負荷と精度の観点からType2が実用的な格子配置と判断し、次章ではこの格子分割に基づいて室内外の解析と評価を行う。

表1 CFD解析における計算条件

CFD Code		Fluent 14.5	
Turbulence Model		Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model)	
Algorithm		Implicit method(SIMPLE)	
Discretization Scheme for Advection Term		Central Differencing	
Time Step		0.0005 s	
Transition Term		2,000 time step (= 1.0 s)	
Total Number of Time Steps for Main calculation		20,000 time step (= 10.0 s)	
Boundary Condition	Inlet	Smirnov's method (Based on k and ϵ)	
	Outlet	Gauge Pressure:0[Pa]	
	Walls	Two Layer Model of Linear - Log Law	
Smagorinsky Coefficient		0.1	
Mesh Type	First Mesh Size in Y Direction[mm]	Total Number of Cells	
type1	0.371	533,028	
type2	1.835	317,251	
type3	2.441	216,384	
type4	7.809	128,952	

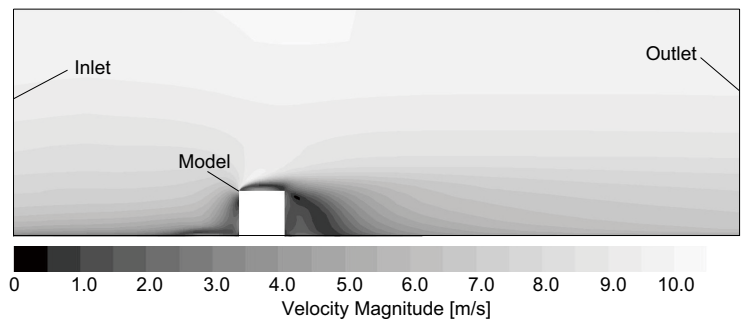


図4 スカラー風速の時間平均値 (Type 2)

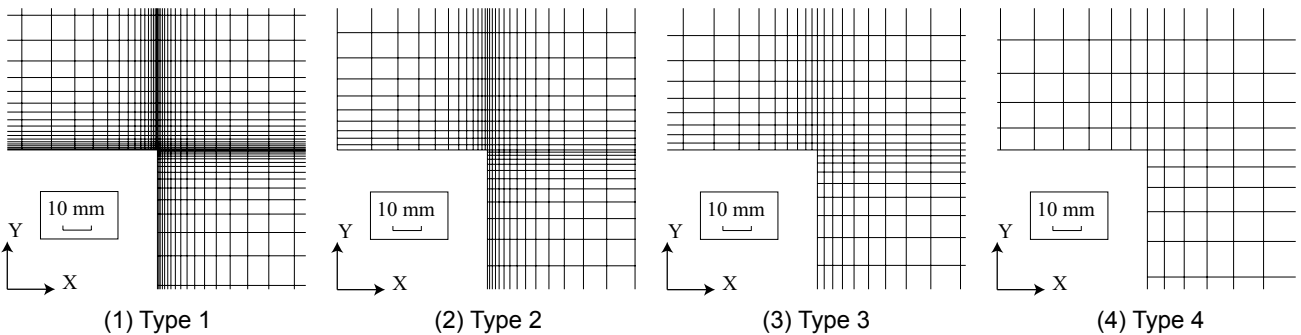


図2 室モデル近傍の格子配置

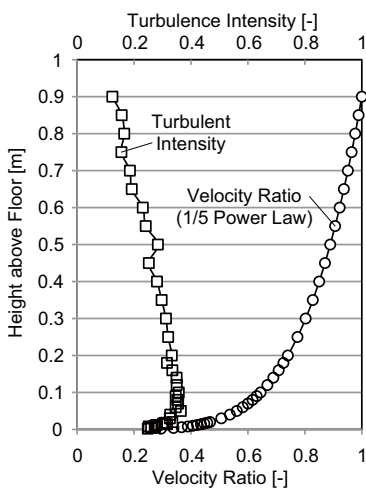


図3 アプローチフローの平均風速及び乱流強度

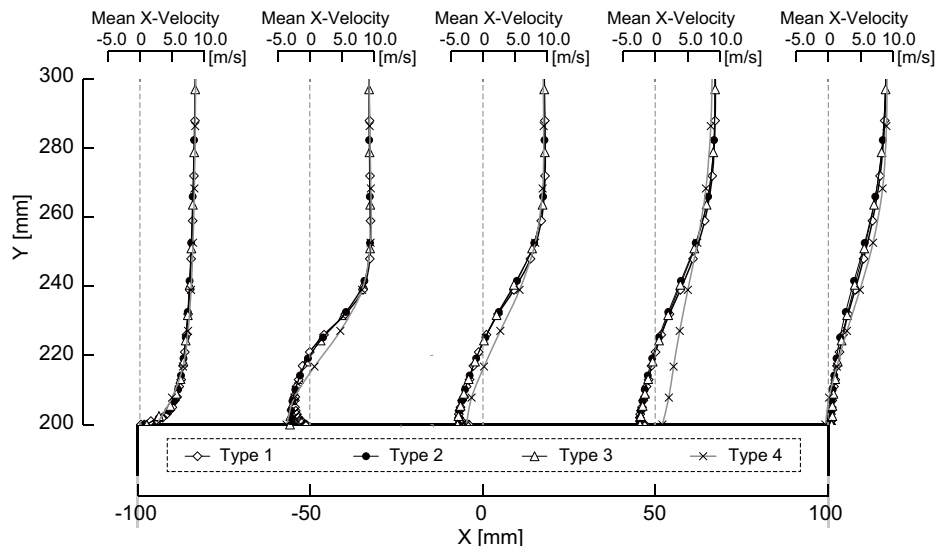


図5 各格子 Type における風速の X 成分の時間平均値

3. 室内外解析による換気効果の評価

3.1 解析の概要

室外側は Type 2 の格子分割とし、単一または対面開口室モデルで室内も含めた解析を行う。開口は正方形とし、寸法 $L = 20, 40, 50, 60, 80$ [mm] の 5 条件を単一開口と対面開口のそれぞれについて解析する。ここで、室モデルの壁面厚さは 2.0 [mm] とした。本研究では PFR を用いて室内換気効果を評価する。PFR は対象領域内で実質的に汚染質を希釈・排出するのに有効な換気空気の流れを示すもので、ある領域内での汚染質発生量 q_p と領域内平均濃度 C_p を

用いて $PFR = q_p / C_p$ として計算する。ここでは室モデル内で 1 / 2,000 秒ごとに表 2 に示す座標を組み合わせた 27 点から粒子を発生 ($q_p=54,000$ [個 / 秒]) させ、個々の粒子の追跡を行い対象領域内の粒子個数濃度 [個 / m^3] を算定することで PFR を求めた。解析方法は前章と同様とし、対象領域内の濃度が概ね収束するまでを総計算時間の目安とした。図 6 に計算開始直後の $Y=100$ mm における瞬時風速ベクトルと粒子分布を示す。濃度の対象領域は室モデル外表面から室内側に 5 mm の室内壁近傍領域を除いた室内空間 ($-95 < x < 95, 5 < y < 195, -95 < z < 95$ [mm]) とした。ここで C_p は発生開始後の定常濃度であるが、条件によっては総計算時間が不十分である可能性を考え、CFD の個数濃度と以下の式で算定される個数濃度の差の二乗和が最小となる換気回数 n [回 / s] を同定することで C_p を算出し、 $PFR (=nV)$ とした (V は対象領域体積 [m^3])。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad (1)$$

3.2 解析結果

図 7 に単一開口条件の CFD で得られた対象領域内の個数濃度と同定された n 及び (1) 式による近似曲線を示す。同様に、図 8 に対面開口条件の結果を示す。開口面積が大きいほど実質的な換気量が大きくなるため収束までの時間は条件によって異なるが、概ね収束している条件は多く、どの条件でも近似曲線

表 2 粒子発生位置

X coordinate [mm]	-66 , 0 , 66
Y coordinate [mm]	33 , 100 , 166
Z coordinate [mm]	-66 , 0 , 66

が CFD 結果に良く一致している。また、単一開口及び風圧係数差のない対面開口を有する室の両条件で気流の乱れによる換気が行われていることが確認できる。ここで得られた実質的な換気回数 n に基づいて算出した PFR と開口面積の合計値との関係を図 9 に示す。単一開口条件と対面開口条件の両方で PFR が概ね開口面積に比例している。対面開口条件では時間平均値では風圧係数差がないものの、瞬時的には圧力差が生じて通風が両方向に交互に発生することにより、単一開口条件と比較して換気効果が著しく大きくなると予測したが、開口面積が同じならば両

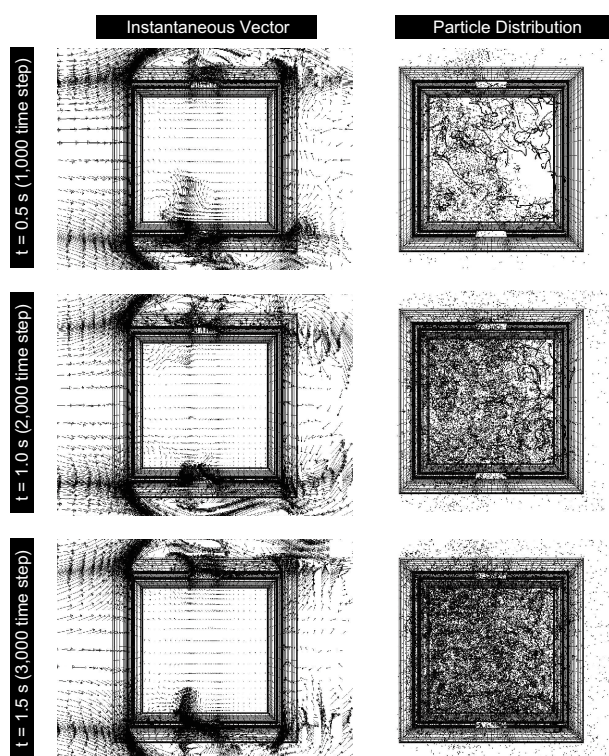


図 6 瞬時の風速ベクトルと粒子分布 (対面開口 $L=40$ mm)

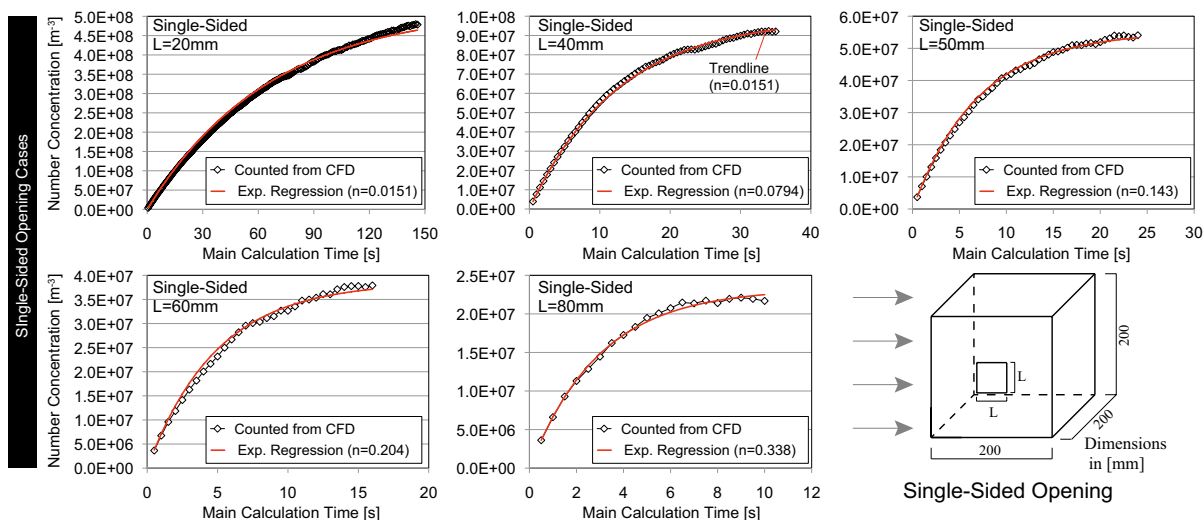


図 7 単一開口条件における対象領域内濃度の推移 (CFD 結果及び同定した n による近似曲線)

者の換気効果に大きな差異はなく、若干増加するという結果になった。このため、風圧係数差のない対面開口条件では、瞬時の風圧係数差により通風が行われることよりも開口面での混合の影響の方が大きいという可能性も考え得る。なお、山中ら⁹⁾は乱流下での単一開口を対象に混合層先端風速 U_w [m/s] と開口面積 A [m²] により換気量 Q [m³/s] = $0.064AU_w$ を提案したが、本研究で開口部高さのアプローチフロー風速 (5.34 [m/s]) を U_w と仮定した場合と概ね程度の結果が得られた。このため、CFD 解析自体は換気効果を比較的良くで予測できていると考えられる。

4. まとめ

本報では風圧係数の時間平均値に差が無い対面開口に焦点を当て、単一及び対面開口条件の LES を行うことで乱れによる換気効果を評価した。今後の課

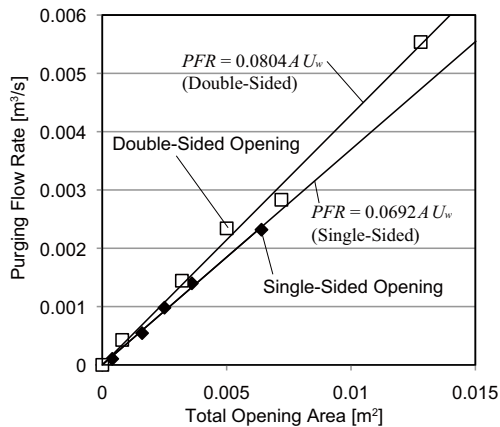


図9 開口面積と PFR の関係 ($U_w = 5.34$ m/s)

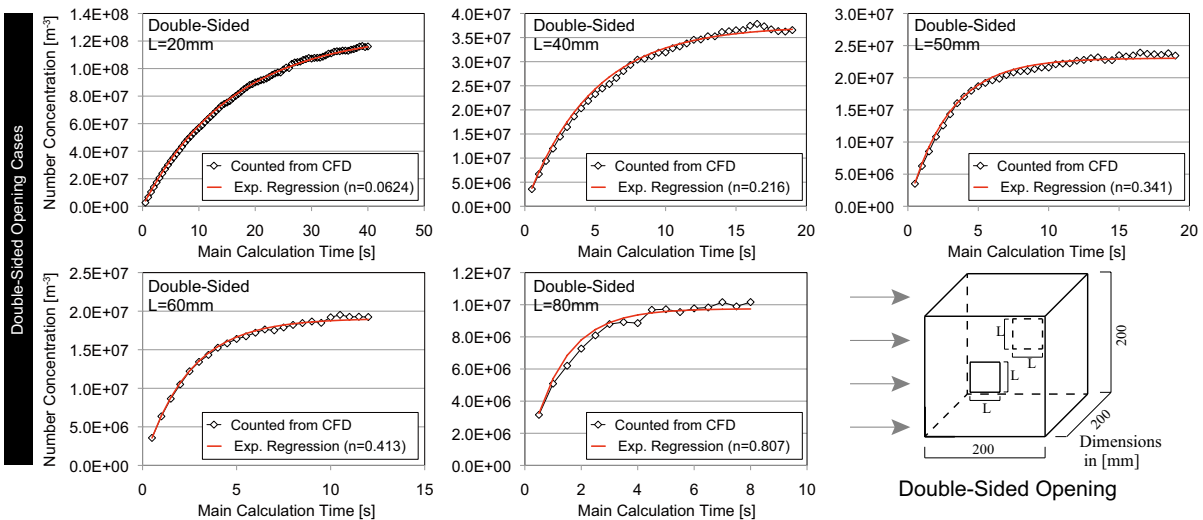


図8 対面開口条件における対象領域内濃度の推移 (CFD 結果及び同定した n による近似曲線)

題として、各開口面内での流入出をそれぞれ評価する等の詳細な現象解明により、瞬時的な風圧差と混合の影響を分離した評価が有用と考えられる。

謝辞

解析を行うにあたり黒川玲嗣氏 (当時立命館大学、現長谷工コーポレーション) 及び大野真斗氏 (当時大阪市立大学、現ヤマダエスバイエルホーム) に多大なるご尽力を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) P.R.Warren and L.M.Parkins: Single-sided ventilation through open window, ASHRAE SP49, pp.209-228, 1985
- 2) 山中俊夫, 檜崎正也, 佐藤隆二, 岩本清孝: 単一開口を持つ室の風力換気に関する研究 - 開口に沿う気流により形成される混合層に基づく換気現象 -, 日本建築学会計画系論文集, 第 517 号, pp.37-43, 1999.5
- 3) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生: 横風時における単一開口換気の特性に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 611 号, pp.29-35, 2007.1
- 4) Kurabuchi T., Ohba M., Endo T., Akamine Y., and Nakayama F. (2004): "Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part1-Theoretical Framework", *The International Journal of Ventilation*, Volume 2 Number 4, pp.371-382, 2004.3
- 5) 甲谷寿史, 山中俊夫: PREDICTION OF INFLOW DIRECTION AT LARGE OPENING OF CROSS VENTILATED APARTMENT BUILDING, 日本建築学会環境系論文集, 第 609 号, pp.39-45, 2006.11
- 6) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 - Particle Tracing による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の基礎的解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 534 号, pp.41-48, 2000.8
- 7) M.Sandberg and D.Etheridge: BUILDING VENTILATION - Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 8) A.Smirnov, et al.: Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle - Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Volume 123, Issue 2, pp.359-371, 2001.6
- 9) T. Yamanaka, H. Kotani et al.: Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, *The International Journal of Ventilation*, Volume 5, Number 1, pp.179-187, 2006.6

* 1 大阪市立大学大学院工学研究科 講師 博士 (工学)
 * 2 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 博士 (工学)
 * 3 立命館大学理工学部 教授 博士 (工学)
 * 4 東洋大学理工学部 准教授 博士 (工学)

Lecturer, Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.
 Professor, Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.
 Professor, Faculty of Science and Eng., Ritsumeikan University, Dr. Eng.
 Associate Professor, Faculty of Science and Eng., Toyo University., Dr. Eng.